

## Лекция 6. МЕСТО ЗЕМЛИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

В 6-ой лекции приводятся некоторые сведения о месте Земли в Солнечной системе, об устройстве самой Солнечной системы: законе планетарных расстояний (законе Тициуса-Бодэ), соизмеримостях и резонансной структуре Солнечной системы, об общих закономерностях движения планет, об эволюции взглядов на устойчивость Солнечной системы. Приводятся сведения об особенностях динамической эволюции малых тел Солнечной системы и роли Луны, о хаосе в наклонах осей вращения планет, об эволюции орбит планет на очень больших интервалах времени.

### Земля в Солнечной системе.

Солнечная система состоит из звезды и обращающихся вокруг неё девяти больших планет, некоторые из них имеют свои спутники, и астероидов. Основная доля вещества сосредоточена в Солнце и лишь около 1/1000 приходится на планеты. Это обстоятельство делает движение планет почти независимым друг от друга на коротких интервалах времени и обуславливает справедливость законов Кеплера:

- орбита каждой из планет представляет собой расположенный в неподвижной плоскости эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце;
- радиус-вектор, соединяющий Солнце с планетой, за равные промежутки времени описывает равные площади;
- квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Таблица 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Планета	Среднее расстояние от Солнца		Сидерический период обращения, земн. годы	Наклонение орбитальной плоскости <sup>1)</sup>	Эксцентриситет орбиты	Экваториальный диаметр, км	Период вращения <sup>2)</sup> , земн. сутки	Наклон экватора к орбите	Видимый блеск, зв. вел.	Магнитное поле
	млн. км	а.е.								
Солнце	-	-	-	-	-	1 392 000	24,7	-	26,7	есть
Меркурий	57,9	0,387	0,241	7,0°	0,206	4880	58,7	< 2°	-1,9	есть
Венера	108,2	0,723	0,615	3,4	0,007	12 100	243	177,3	-4,4	нет
Земля	149,6	1,000	1,000	-	0,017	12 756	0,9973	23,5	—	есть
Марс	227,9	1,523	1,881	1,9	0,093	6780	1,026	25,2	-2,8	нет
Юпитер	778,3	5,202	11,862	1,3	0,048	142 800	0,413	3,1	-2,5	есть
Сатурн	1427,0	9,538	29,46	2,5	0,056	120 000	0,443	26,7	-0,4	есть
Уран	2869,6	19,182	84,01	0,8	0,046	50 800	0,718	97,9	+5,7	есть

Нептун	4496,6	30,058	164,79	1,8	0,009	48 600	0,669	29,6	+7,6	есть
Плутон	5900	39,44	247,7	17,3	0,249	2300	6,387	122,5	+14,0	?

<sup>1)</sup> Относительно плоскости орбиты Земли.

<sup>2)</sup> Период сидерического вращения экваториальной области

Таблица 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ (продолжение)

Планета	Диаметр	Масса	Сила тяжести	Средняя плотность	Атмосфера
	(в единицах земной величины)			(г/см <sup>3</sup> )	
Солнце	109	333 000	28,0	1,41	H, He, и др.
Меркурий	0,38	0,055	0,38	5,42	-
Венера	0,95	0,815	0,89	5,25	CO <sub>2</sub>
Земля	1,0	1,0	1,0	5,51	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
Марс	0,53	0,108	0,38	3,96	CO <sub>2</sub>
Юпитер	11,2	318	2,5	1,33	H <sub>2</sub> , He, и др.
Сатурн	9,4	95	1,1	0,70	H <sub>2</sub> , He, и др.
Уран	4,0	14,5	0,9	1,3	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , и др.
Нептун	3,8	17,2	1,2	1,8	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , и др.
Плутон	0,18	0,002	∇ 0,06	1,7	CH <sub>4</sub>

Таблица 2. СПУТНИКИ ПЛАНЕТ

Название	Радиус орбиты, тыс. км	Период обращения, сут.	Диаметр, км	Кем и когда открыт
<i>Спутник Земли</i>				
Луна	384,4	27,3	3475	-
<i>Спутники Марса</i>				
Фобос	9,4	0,3	21*	Холл 1877
Деймос	23,5	1,3	12*	Холл 1877
<i>Спутники Юпитера</i>				
Метида	128	0,3	(40)	Синнот 1979
Адрастея	129	0,3	(25)	Джюит и др. 1979
Амальтея	181	0,5	195*	Барнард 1892
Теба	221	0,7	(80)	Синнот 1979

Ио	422	1,8	3640	Галилей 1610
Европа	671	3,6	3130	Галилей 1610
Ганимед	1070	7,2	5280	Галилей 1610
Каллисто	1883	16,7	4850	Галилей 1610
Леда	11094	239	(15)	Коуэл 1974
Гималия	11480	251	170	Перрайн 1904
Лиситея	11720	259	(20)	Никольсон 1938
Элара	11737	260	80	Перрайн 1905
Ананке	21200	631	(20)	Никольсон 1951
Карме	22600	692	(30)	Никольсон 1938
Пасифе	23500	735	(40)	Мелотт 1908
Синопе	23700	758	(30)	Никольсон 1914
<i>Спутники Сатурна</i>				
Пан	134	0,6	(20)	Шоуолтер 1990
Атлант	138	0,6	(30)	Террил 1980
Прометей	139	0,6	(110)	Коллинз и др. 1980
Пандора	142	0,6	(100)	Коллинз и др. 1980
Эпиметей	151	0,7	(130)	Фонтейн и др. 1966
Янус	151	0,7	190	Дольфюс 1966
Мимас	186	0,9	390	Гершель В. 1789
Энцелад	238	1,4	500	Гершель В. 1789
Тефия	295	1,9	1060	Кассини 1684
Телесто	295	1,9	(30)	Смит и др. 1980
Калипсо	295	1,9	(30)	Паску и др. 1980
Диона	377	2,7	1120	Кассини 1684
Елена	377	2,7	(35)	Лак и др. 1980
Рея	527	4,5	1530	Кассини 1672
Титан	1222	15,9	5150	Гюйгенс 1655
Гиперион	1481	21,3	300	Бонд и др. 1848
Япет	3561	79,3	1460	Кассини 1671
Феба	12952	550,5	(220)	Пикеринг У. 1898
<i>Спутники Урана</i>				
Корделия	50	0,3	(25)	"Вояджер-2" 1986
Офелия	54	0,4	(30)	"Вояджер-2" 1986
Бианка	59	0,4	(40)	"Вояджер-2" 1986

Крессида	62	0,5	(60)	"Вояджер-2" 1986
Дездемона	63	0,5	(50)	"Вояджер-2" 1986
Джульетта	64	0,5	(80)	"Вояджер-2" 1986
Порция	66	0,5	(110)	"Вояджер-2" 1986
Розалинда	70	0,5	(50)	"Вояджер-2" 1986
Белинда	75	0,6	(70)	"Вояджер-2" 1986
Пэк	86	0,8	(150)	"Вояджер-2" 1985
Миранда	129	1,4	480	Койпер 1948
Ариэль	191	2,5	1160	Ласселл 1851
Умбриэль	266	4,1	1170	Ласселл 1851
Титания	436	8,7	1580	Гершель В. 1787
Оберон	584	13,5	1520	Гершель В. 1787
Калибан	7169	580	(60)	Глэдман и др. 1997
Сикоракса	12 214	1290	(120)	Никольсон и др. 1997
<i>Спутники Нептуна</i>				
Наяда	48	0,3	(50)	"Вояджер-2" 1989
Таласса	50	0,3	(80)	"Вояджер-2" 1989
Деспина	53	0,3	(150)	"Вояджер-2" 1989
Галатейя	62	0,4	(160)	"Вояджер-2" 1989
Ларисса	74	0,6	(200)	"Вояджер-2" 1989
Протей	118	1,1	420	"Вояджер-2" 1989
Тритон	355	5,9	2700	Ласселл 1846
Нереида	5513	360,2	340	Койпер 1949
<i>Спутник Плутона</i>				
Харон	19,4	6,4	1200	Кристи 1978
() — ненадежное значение * - средний диаметр тела неправильной формы				

Одна из наиболее примечательных закономерностей, свойственных Солнечной системе, это закон планетарных расстояний (от Солнца до планеты) Тициуса-Боде. Он показывает, что расстояние планет от Солнца подчиняется простой эмпирической зависимости:

$$R = 0.4 + 0.3 \times 2^n.$$

Здесь  $R$  – расстояние (в астрономических единицах – а.е.; 1 а.е. равна расстоянию Земли от Солнца, примерно 150 млн. км),  $n$  – целые числа (для Меркурия,  $n = -\infty$ , для Венеры,  $n = 0$ , для Земли,  $n = 1$  и т.д.). Аналогичные закономерности характеризуют расстояния от планеты до спутников в системах Юпитера, Сатурна и Урана (см. рис.). Этот факт

подчеркивает общность механизмов формирования Солнечной системы и систем спутников этих планет. На рисунке показана зависимость не в расстояниях от Солнца, а в периодах обращения планет вокруг Солнца  $T$ , дело в том, что  $R^3/T^2 = \text{const}$  для планет и спутников. Эта зависимость следует из третьего закона Кеплера.

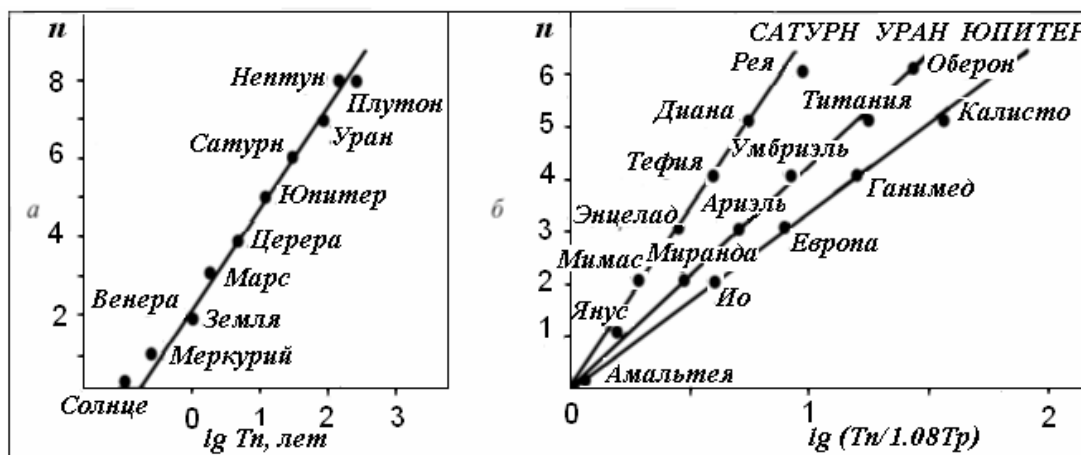


Рис. 1. Закон Тициуса-Бодде для Солнечной системы и систем Сатурна, Урана и Юпитера.

Астроном Гершель, в соответствии с правилом Тициуса-Бодде, открыл планету Уран ( $n = 6$ ) в 1781 г. Поиски отсутствующей планеты, расположенной между Марсом и Юпитером, привели к открытию в 1801 г. первого из Астероидов – Цереры. После этих замечательных открытий у ученых того времени возникла твердая уверенность в том, что мы имеем дело с законом природы. И даже тот факт, что Нептун и Плутон “не вписываются” в этот закон не поколебал их уверенности. Закономерность, аналогичная правилу Тициуса-Бодде справедлива и для многих спутников Юпитера, Сатурна и Урана ( $T_n \approx T_0 \times A^n$ , где  $T_n$  – период обращения  $n$ -ого спутника вокруг планеты,  $T_0$  и  $A$  – постоянные), что еще раз подтверждает, что мы имеем дело не со случайным процессом, а с явлением природы. Надо сказать, что многочисленные попытки найти объяснение этим закономерностям не привели к ожидаемому результату.

Правило Тициуса-Бодде составлено относительно расстояния (и периода обращения) Земля-Солнце. У. Кэри принимает за единицу расстояние Солнце-Юпитер (Кэри, 1991). В этом случае соотношения реальных периодов ближе - к соотношениям периодов, полученных по формуле  $T_n = 3J \cdot 2^{n-1}$ , где  $J$  – сидерический период обращения Юпитера (т.е. относительно звезд, в отличие от синодического периода – относительно Земли), а  $T_n$  – период обращения относительно Юпитера  $n$ -ой планеты, расположенной дальше Юпитера. Для планеты внутри орбиты Юпитера - берется обратная формула (см. таблицу).

Меркур.	Венера	Земля	Марс	Астер.	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
1/48	1/24	1/12	1/6	1/3	1	3	6	12	24
1/49.2	1/19.3	1/11.9	1/6.3	1/3	1	2.5	7.1	13.9	20.9

Возможно, эти законы и правила можно поставить в один ряд с уже давно обнаруженными удивительными т.н. резонансными свойствами частот (периодов) обращения планет (спутников) вокруг Солнца (планеты). Хорошо известный всем пример резонанса, это обращение Луны вокруг Земли. Скорость обращения Луны вокруг своей оси точно равна скорости обращения её вокруг Земли. Именно поэтому мы видим только одну сторону Луны.

В любом случае, правила типа закона Тициуса-Боде, или резонансные свойства Солнечной системы, обязаны одной из двух (либо обоим сразу) причин: Это следствие образования планетной системы, либо результат очень длительного процесса взаимодействия небесных тел между собой.

На рис. 6-6 показаны размеры планет относительно Солнца. Можно видеть, что если в расстояниях планеты от Солнца имеется строгая зависимость, то этого нет в вариации массы всех планет. Правда, можно отметить, что масса ближайших к Солнцу 4-х планет значительно уступает планетам-гигантам, а масса их, в свою очередь, убывает по мере удаления от Солнца. Эти группы планет разделяются между собой поясом Астероидов, вместо которого, как принято считать, должна была бы находиться планета Фэтон. Плутон и, совсем недавно открытая планета Седна, - с недавних пор планетами больше не считаются.

Исследования последних лет показали, что, по-видимому, не исчерпаны возможности объяснения этих фактов в рамках чисто небесно механической постановки задачи многих тел. При таком подходе объяснение закономерностей движения небесных тел ищут, изучая то, как будут сказываться на их движениях взаимные влияния по закону Ньютона. Стало ясно, что расположение орбит планет и большинства естественных спутников в одной плоскости не является случайным и может быть объяснено действием чисто гравитационных сил взаимного возмущения. Оказывается, что орбиты с большими наклонами очень неустойчивы. Если бы планеты с такими орбитами когда-то и существовали, то они очень быстро должны были бы упасть на Солнце. Например, Луна, если бы её орбита была нормальна к плоскости эклиптики, только за счет возмущений от Солнца, упала бы на Землю примерно через 4.5 года. Существование спутников Урана с орбитами, наклоненными к его орбите под углом  $98^\circ$ , не противоречит этому результату, так как этот случай объясняется тем, что возмущения от других тел устойчиво скомпенсированы возмущениями от нецентральной части тяготения Урана, обусловленной его сжатием.

Пока нет достаточно убедительных объяснений малости эксцентриситетов планетных орбит, но для внутренних спутников больших планет она может быть объяснена, если помимо гравитационных сил учесть и приливную диссипацию энергии в этих системах. Известно, что взаимодействие спутника с порождаемым им приливом на планете, приводит к увеличению эксцентриситета его орбиты. Но существует механизм, действующий в обратном направлении, он связан с радиальным приливом на спутнике. Для спутника с синхронным вращением, когда он, подобно Луне, повернут к планете одной стороной (этим свойством обладают все синхронные спутники), радиальный прилив существует только для спутников с эллиптической орбитой. Диссипация энергии на спутнике ведет к уменьшению эксцентриситета орбиты. Преобладание этого механизма в ходе эволюции могло обеспечить малость эксцентриситетов спутниковых орбит. Но такое объяснение не подходит для планет. Если принять для приливной диссипации энергии в теле планеты её современное значение, то она оказывается слишком малой, чтобы обеспечить эволюцию к почти круговым орбитам за время существования Солнечной системы.

Особенно много дискуссий было о законе Тициуса-Боде. Физическая значимость его соотношения и различных модификаций закона не очевидна, поскольку она не является следствием какой-либо теории. Некоторые авторы не исключают возможности случайного происхождения наблюдаемого распределения планетных и спутниковых расстояний от центральных тел. Другие видят в нем отражение начальных условий образования планетной системы. Но большее число исследователей склоняется к мысли о его эволюционном происхождении.

**Резонансы в Солнечной системе.** Впервые гипотезу о резонансной структуре Солнечной системы высказал А.М. Молчанов (Пудовкин и др. 1977). Основанием для этого послужило то, что закон планетарных расстояний (закон Тициуса-Бодде) не совсем адекватен сути явления. Более удачная форма описания явления пропорциональности расстояний между планетами и спутниками, по Молчанову, заключается в представлении этой особенности как соразмерности частот их вращений: планет - вокруг Солнца, а спутников - вокруг планет. Простые целочисленные соотношения более естественно возникают и легче интерпретируются в соотношениях между частотами, а переход к расстояниям планет от Солнца может быть сделан по третьему закону Кеплера. Преимущества такого подхода заключаются в том, что с одних позиций могут быть рассмотрены многочисленные случаи соразмерности между частотами в Солнечной системе.

В качестве иллюстрации к сказанному, обратимся к рисунку 2-2, на котором приведены периоды обращений планет и регулярных спутников планет-гигантов (Дермот, 1976). Период обращения  $n$ -го тела:  $T_n \approx T_o A^n$ , где  $T_o$  и  $A$  - произвольные постоянные, различные для каждой из подсистем.

Под соразмерностью, или резонансностью системы, в которой тела обращаются с частотами  $\omega_i$ , понимают выполнение линейного соотношения:

$$n_1 \omega_1 + n_2 \omega_2 + \dots + n_k \omega_k = 0,$$

в котором коэффициенты  $n_i$  являются целыми числами.

Существование некоторых соотношений такого типа для орбитальных частот небесных тел было известно давно. Эйлер и Лагранж пытались объяснить резонансную связь между частотами Юпитера и Сатурна:  $2\omega_{Ю} - 5\omega_{С} \approx 0$ . В свое время Лаплас обнаружил соразмерность между планетоцентрическими долготами спутников Юпитера - Ио, Европы и Ганимеда:  $\lambda_1 - 3\lambda_2 + 2\lambda_3 \approx \pi$ , которая означает, что выполняется соотношение:  $\omega_1 - 3\omega_2 + 2\omega_3 = 0$ .

Вместе с тем существуют соразмерности другого рода. Известно, что многие спутники планет имеют частоты вращения, совпадающие с частотой их обращения вокруг центрального тела, демонстрируя резонанс 1: 1. Наиболее известным примером является резонанс Земля - Луна. Частота вращения Меркурия связана с частотой его обращения соотношением 2: 3. Известно, что в распределении астероидов на орбитах, соответствующих соразмерностям 1: 2; 2: 5; 1: 3; наблюдаются "пробелы Кирквуда". Аналогичный резонансный характер имеет щель Кассини в кольцах Сатурна и т.п.

Поразительны соразмерности обращения планет Меркурия и Венеры. Оказывается, что движение Меркурия вокруг Солнца и вокруг своей оси согласовано с движением Земли. Соединение Земли и Меркурия происходит каждые 116 суток. За это время Меркурий делает ровно два оборота вокруг своей оси и, оказавшись в нижнем соединении с Землей, всегда повернут к ней в этом положении одной и той же стороной. Аналогично Меркурию, ведет себя Венера, которая с периодичностью 584 дня, сближаясь с Землей, оказывается в нижнем соединении. В эти моменты Венера неизменно обращена к Земле одной и той же стороной.

Обсуждение динамического смысла отдельных соразмерностей ведется много лет. Еще в 1954 г. А.Е. Рой и М.В. Овенден нашли, что в Солнечной системе и её спутниковых подсистемах случаи парной соразмерности орбитальных частот встречаются чаще, чем это могло бы быть при случайном распределении. В качестве причины выдвигалась альтернатива: либо "виновата" специфика образования Солнечной системы, либо, - особая устойчивость конфигураций, соответствующих соразмерности. Анализ спутниковых систем Юпитера и Сатурна привел авторов к выводу, что вторая гипотеза более вероятна. По Рою и Овендену, объяснение состоит в том, что любые пары планет или спутников стремятся проводить большую часть времени вблизи некоторых периодических орбит,

которые тем устойчивее, чем чаще повторяется т.н. “зеркальная конфигурация”, когда радиус-векторы материальных точек, проведенные из центра инерции этой системы, перпендикулярны к векторам скоростей. Для этого необходимо, чтобы орбитальные частоты материальных точек были приблизительно соизмеримы.

Другая гипотеза была высказана П. Голдрейхом в 1965 г. Согласно этой гипотезе, соизмеримость в спутниковых подсистемах имеет приливную природу. Тенденция к соизмеримости орбитальных частот должна проявляться в этом случае только такими спутниками, для которых приливные эффекты достаточны для того, чтобы обеспечить заметное изменение орбиты за время существования Солнечной системы. Если в результате приливной эволюции, отношение частот обращения двух спутников приближается к отношению двух малых целых чисел, то характер дальнейшей эволюции принимает своеобразную форму. Оказывается, что может иметь место такое перераспределение момента количества движения между планетой и спутником, чтобы квазисоизмеримость сохранялась. Для этого необходимо достаточно сильное гравитационное взаимодействие между ними, иначе эволюция их орбит будет независимой и соизмеримость частот не будет устойчивой.

Гипотеза Голдрейха, основанная на учете приливных диссипативных сил, не может объяснить случаи соизмеримостей между частотами спутников со слабым гравитационным взаимодействием. Модель Роя и Овендена базируется на использовании только консервативных, ньютоновских сил. Гипотеза Молчанова относится к области взаимодействия многочастотных нелинейных колебательных систем, а Солнечная система привлекается лишь как объект иллюстрации природы эволюции таких систем. Молчанов оценил вероятность наблюдаемого состояния Солнечной системы как  $3 \times 10^{-12}$ . Это означает, что планетная система, подобная солнечной, при случайном образовании, могла бы встретиться один раз среди десяти галактик, подобной нашей и содержащей  $10^{11}$  звезд, если считать, что у каждой звезды есть планетная система. С такой уникальностью Солнечной системы трудно согласиться. Единственная, приемлемая альтернатива - признать вместе с Молчановым, что резонансные свойства системы являются следствием её образования и эволюционной зрелости. Но тогда необходимо понять, почему с точки зрения классической механики резонансные состояния крайне маловероятны.

Независимо от своей природы: механической, химической, или биологической, нелинейные колебательные системы в ходе динамической эволюции проявляют тенденцию выходить за особый синхронный режим движения. Совокупность  $N$  изолированных друг от друга объектов, совершающих колебания с различными частотами, при наложении даже очень слабых связей, переходят в такой режим движений, при котором частоты объектов становятся равными, кратными или находятся в рациональных отношениях. Математически это выражается в необходимом удовлетворении некоторого количества  $m$  независимых, линейных относительно частот, резонансных соотношений:

$$\sum n_k^{(i)} \times \omega_k \approx 0; i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $\omega_k$  - частоты объектов;  $n_k^{(i)}$  - целые числа.

Аналогичная зависимость устанавливается и между фазами колебаний (см. таблицу).

Для планетных систем, рассматриваемых как набор слабо связанных нелинейных осцилляторов, Молчанов предположил, что конечной стадией их эволюции является синхронный режим, при котором имеется максимально возможное число резонансных соотношений - на единицу меньше, чем число частот. В этом максимально резонансном состоянии структура системы однозначно определяется целочисленной резонансной матрицей, составленной из компонент  $n_k^{(i)}$  резонансных векторов  $n^{(i)}$  так, что знание



частоты обращения вокруг Солнца одной планеты позволяет вычислить частоты всех других.

### Резонансные соотношения для планет Солнечной системы.

Планета	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$	$n_7$	$n_8$	$n_9$	$\omega^H$	$\omega^T$	$(\omega^H - \omega^T)/\omega^H$
1. Меркурий	1	-1	-2	-1	0	0	0	0	0	49.2508	49.1904	0.0012
2. Венера	0	1	-1	-1	-1	0	-1	0	0	19.2816	19.2619	0.0010
3. Земля	0	0	1	-2	1	-1	1	0	0	11.8618	11.8333	0.0024
4. Марс	0	0	0	1	-6	0	-2	0	0	6.3067	6.2857	0.0033
5. Юпитер	0	0	0	0	1	-2	-1	0	-1	1.0000	1.0000	-
6. Сатурн	0	0	0	0	0	1	-2	-1	-1	0.40269	0.40476	-0.0051
7. Уран	0	0	0	0	0	0	1	-2	0	0.14119	0.14285	-0.0118
8. Нептун	0	0	0	0	0	0	1	0	-3	0.07198	0.07143	+0.0077
9. Плутон	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0.04750	0.04762	-0.0025

$\omega^H$  - наблюдаемые частоты,  $\omega^T$  - теоретические частоты.

Несмотря на отсутствие теории, позволяющей однозначно найти  $n_k^{(i)}$ , Молчанов сумел построить резонансные матрицы для четырех систем: Солнечной системы и спутниковых систем Юпитера, Сатурна и Урана.

Гипотеза Молчанова не доказана, она не дает ответа на вопросы, почему планеты и часть астероидов находятся на резонансных орбитах, а другая часть астероидов эти орбиты избегает? Не ясны механизмы синхронизации. Остается дискуссионным вопрос о роли консервативных и диссипативных факторов. Проведена серия вычислительных экспериментов. Масса центрального тела задавалась равной массе Солнца, число, масса планет и их начальные орбиты варьировались. Планеты взаимодействовали по ньютоновским законам, без учета диссипации. По результатам экспериментов видно, что эволюция планет идет к определенным стационарным состояниям.

М.В. Овенден показал, что спутники Юпитера: Ио, Европа, Ганимед, частоты обращений которых:  $\omega_1 - 3\omega_2 + 2\omega_3 \approx 0$ , действительно находятся очень близко от минимальной конфигурации. Аналогичный результат получен для спутников Урана: Миранды, Ариэля и Умбриэля, частоты которых удовлетворяют такому же соотношению, но с меньшей точностью. Полное время эволюции этих систем примерно равно возрасту Солнечной системы. На оценки времени эволюции не влияет выбор начальной конфигурации, так как эволюция происходит быстро вдали от минимальной конфигурации и медленно вблизи неё.

Интересный результат получен при применении этой методики к Солнечной системе. Для системы, состоящей из Солнца, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, соответствие с принципом наименьшего взаимодействия достигается в том случае, если бы на месте пояса астероидов была бы планета с массой в сто раз большей массы Земли. При таком предположении оказывается близкой к минимальной конфигурация системы: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер. Таким образом, имеется внутренняя согласованность эволюционной картины всей планетной системы.

Овенден выдвинул принцип наименьшего взаимодействия, который гласит, что спутниковая (или планетная) система из  $N$  точечных масс, двигаясь под действием взаимного гравитационного притяжения, будет большую часть времени находиться в конфигурации, для которой среднее во времени от действия, обусловленного спутниками, минимально.

Вырисовывается картина протекания эволюции в Солнечной системе, противоположная ньютоновской: возмущающие силы, которые, по мнению Ньютона, должны приводить планеты в беспорядок, в действительности связывают их в единую

систему с четко выраженной упорядоченностью. Суть этой упорядоченности, по гипотезе Молчанова, состоит в установлении определенного резонансного состояния.

По мнению В.В.Белецкого, "... необходимыми условиями реализуемости резонансного движения являются:

- существование консервативного фактора в системе, создающего резонансные "ловушки", - области устойчивости, в окрестности резонанса;
- существование диссипативного фактора, создающего условия для захвата движения резонансной "ловушкой".

В Солнечной системе основным консервативным фактором является гравитационное взаимодействие, основным диссипативным фактором - приливное торможение. От характера консервативных и диссипативных сил во многом зависит реализуемость резонансного движения" (Белецкий, 1986, с.23). Этот автор рассматривает некоторые резонансы Солнечной системы, в частности, резонансы низкого порядка, когда угловые скорости осевого ( $\Omega$ ) и вращательного ( $\omega$ ) движения близки друг к другу. Так, например, в резонансе Луны угловые скорости осевого и вращательного движения равны друг другу ( $\Omega = \omega$ ). Такое движение называется "относительным равновесием": тело покоится во вращающейся орбитальной системе координат и вследствие этого все время обращено одной стороной к центру притяжения. В резонансе Меркурия  $2\Omega = 3\omega$ , он делает ровно три оборота вокруг своей оси ровно за два орбитальных периода. Белецкий приходит к заключению о том, что резонансы низкого порядка реализуются в системах двух гравитирующих тел. Резонансы более высокого порядка обусловлены взаимодействием более, чем двух тел. Он отмечает существенную роль в эволюции вращения консервативных гравитационных моментов: именно они конструируют "ловушки", обеспечивающие захват ряда небесных тел в резонансное вращение под влиянием приливного момента. Белецкий предложил так же схему такого захвата и дал оценку времени эволюции вращательного движения Земли при современном значении приливного фактора (добротность порядка 100). Это время оказывается порядка  $10^5$  лет. Для Юпитера добротность выше, больше и время,  $10^7$  лет.

Солнечная система, с точки зрения А.М. Чечельницкого (1986), это волновая динамическая система, компонентами которой являются как сами небесные тела (Солнце, планеты, спутники, малые тела), так и межпланетное, континуальное наполнение - материальная среда (межпланетная плазма, электромагнитные поля и пр.), т.е. вещество и поле, описываемое в едином динамическом контексте. Соответствующий инструмент, дающий динамическое и феноменологическое описание подобных систем, Чечельницкий называет мегаквантовой волновой астродинамикой.

В заключение приведем высказывание Г.С.Нариманова: "Резонансные свойства движения, определенная последовательность значений планетных расстояний и другие особенности, наблюдаемые в строении Солнечной системы и в движении планет, не могут считаться случайными явлениями - они должны найти свое объяснение как проявление определенной природной закономерности" (Чечельницкий, 1986, с. 57).

### **Общие закономерности движения планет.**

Все планеты движутся по орбитам в одну сторону, совпадающую с направлением вращения Солнца вокруг своей оси. Это направление против часовой стрелки, если смотреть на Солнечную систему со стороны Северного полюса Земли (а также Солнца и других планет). Такое направление называют прямым. (Противоположное направление - обратным).

Большинство планет вращается вокруг своей оси в прямом направлении (с запада на восток). Уран и Плутон вращаются лежа на боку. Тот небольшой угол, который есть между плоскостью орбиты каждой из этих двух планет и осью их осевого вращения, позволяют определить и для них направление вращения вокруг оси. Это направление обратное. Чуть по иному обстоит дело с Венерой. Ось вращения планеты почти

перпендикулярна плоскости орбиты, но и тут наблюдается обратное вращение. У всех остальных планет угол между осью вращения и плоскостью орбиты не больше чем на  $30^\circ$  отличается от прямого. Плоскости орбит планет близки к плоскости экватора Солнца. Только орбита Плутона больше, чем на  $15^\circ$ , отстоит от этого среднего уровня. Эта величина называется наклоном орбиты. Для остальных планет этот наклон меньше, чем  $5^\circ$ . Только Меркурий дотянул до  $7^\circ$ . Меркурий и Плутон, таким образом, имеют самые вытянутые орбиты, которые значительно наклонены к некоторой средней плоскости Солнечной системы. За эту нулевую плоскость обычно принимают не плоскость солнечного экватора, а плоскость орбиты Земли. Эта плоскость совпадает с плоскостью эклиптики – годовому пути Солнца по небу.



### **Эволюция взглядов на устойчивость Солнечной системы (Кузнецов, 1999).**

До открытия закона всемирного тяготения вопрос об устойчивости системы Мира решался а priori. Сначала делалось предположение о фундаментальном свойстве Мира — устойчивости, хаотичности и т.п. — затем создавалась система. По сути, эти системы были кинематическими. Ньютон первым построил динамическую модель Солнечной системы и сразу же столкнулся с вопросом о ее устойчивости. Он вышел из этого затруднения с помощью Великого Часовщика, который время от времени должен возвращать планеты на их орбиты.

В дальнейшем понятие устойчивости развивалось параллельно с исследованиями движения планет. Лагранж считал движение устойчивым, если оно происходит в замкнутой области пространства. Согласно теореме Лапласа–Лагранжа (1773, 1776) об отсутствии вековых возмущений больших полуосей планетных орбит, их изменение с точностью до величин первого порядка малости относительно возмущающих масс можно представить в виде суммы тригонометрических слагаемых. На основе этой теоремы в 1773 Лаплас сформулировал теорему об устойчивости Солнечной системы: если движение планет происходит в одном направлении, их массы одного порядка, эксцентриситеты и наклоны малы, а большие полуоси испытывают лишь небольшие колебания относительно среднего положения, то эксцентриситеты и наклоны орбит будут оставаться малыми на рассматриваемом интервале. Вывод обнадеживающий. Однако в настоящее время эта теорема имеет только исторический интерес. Она не применима на интервалах времени, сравнимых с возрастом Солнечной системы, поскольку учитывает возмущения только первого порядка. Кроме того, массы тел Солнечной системы различаются существенно.

Позднее, в 1809 Пуассон показал, что во втором приближении решение для большой полуоси может содержать тригонометрические слагаемые с амплитудой, пропорциональной времени. Соответствующее определение устойчивости по Пуассону требует, чтобы частица за бесконечное время, бесконечное число раз - проходила через сколь угодно малую окрестность начальной точки.

Наиболее удачное понятие устойчивости сформулировал в конце XIX века русский математик А.М.Ляпунов. Исследуемое движение считается устойчивым, если все возможные движения, мало отличающиеся от него в начальный момент, в последующем будут мало отклоняться от него на всем интересующем интервале времени. Если же найдется хотя бы одно (!) движение, в начальный момент мало отличающееся от исследуемого, которое постепенно, пусть и через большой промежуток времени, заметно отклонится от него, то исследуемое движение — неустойчиво. Это определение и по сей день считается основным.

В задачах небесной механики рассматривается устойчивость по части переменных: большой полуоси (задает размер орбиты), эксцентриситету (определяет вытянутость орбиты) и наклону орбиты. Совместная эволюция этих трех элементов должна удовлетворять определению устойчивости по Ляпунову. Солнечная система устойчива (по Ляпунову), если размеры, форма и наклоны орбит, - остаются близкими к начальным, - на всем рассматриваемом интервале времени. Говоря об устойчивости Солнечной системы, как правило, имеют в виду устойчивость движения больших планет на бесконечном или очень большом, сравнимом с ее возрастом, интервале времени. В этом случае крайними проявлениями неустойчивости являются уход из Солнечной системы, падение на Солнце или столкновение с другой планетой. Такое событие способно существенно изменить структуру и динамику Солнечной системы.

В последнее время появилось большое число исследований по динамике малых тел Солнечной системы. Для этих объектов неустойчивость чаще всего проявляется в существенном изменении размеров, формы и наклона орбиты, зачастую многократном, и только после этого происходит уход из Солнечной системы, падение на Солнце или столкновение с планетой. Благодаря тому, что массы этих объектов незначительны, а их число велико, неустойчивое движение одного объекта, или даже группы, почти не влияет на устойчивость Солнечной системы в целом, хотя и играет важную роль в формировании ее структуры.

Классический метод исследования движения небесных тел заключается в представлении решения соответствующих уравнений возмущенного движения в виде отрезков рядов. В конце XIX века Анри Пуанкаре показал, что ряды, применяемые для описания движения небесных тел, расходятся. Следовательно, их нельзя использовать для анализа поведения Солнечной системы на бесконечном интервале времени. Казалось бы, это не страшно, ведь Солнечная система имеет хотя и большую, но ограниченную эволюционную шкалу. Но полученные Пуанкаре интервалы применимости классических рядов, оказались значительно короче возраста Солнечной системы.

Эта трудность была преодолена лишь в начале 60-х гг. прошлого столетия. Математики А.Н.Колмогоров, В.И.Арнольд и Ю.Мозер разработали теорию, получившую название КАМ-теория. Ее приложение к Солнечной системе дает следующую теорему: *если массы планет достаточно малы, эксцентриситеты и наклоны орбит малы, то для большинства начальных условий (исключая резонансные и близкие к ним) движение будет условно-периодическим, эксцентриситеты и наклоны будут оставаться малыми, а большие полуоси будут вечно колебаться вблизи своих первоначальных значений*, то есть Солнечная система будет устойчивой по Ляпунову на бесконечном интервале времени. КАМ-теория справедлива с очень существенной оговоркой: при условии отсутствия резонансов. К сожалению, в реальной Солнечной системе резонансы играют очень важную роль. Поэтому, выводы КАМ-теории не могут быть применены к Солнечной системе в целом на всем интервале ее существования.

Каковы условия возникновения резонансов? Главное — соизмеримость частот. Различают два основных типа резонансов: резонанс средних движений, возникающий вследствие соизмеримости средних движений объектов, и вековой резонанс между средними движениями долгот восходящих узлов и аргументов перицентров объектов. Наиболее сильно проявляются резонансы низких порядков, когда отношение частот можно представить в виде рациональной дроби с небольшими значениями числителя и знаменателя, например,  $2/1$ ,  $3/1$ ,  $3/2$ ,  $4/3$  и т.п.

При наличии резонансов, - эволюция динамической системы может идти следующим образом. 1) Система пройдет через резонанс, что приведет к резкому скачкообразному изменению элементов орбиты, например, эксцентриситета или наклона. 2) Система застрянет в резонансе и перейдет в новое состояние с либрационным режимом движения, в котором позиционные элементы (большая полуось, эксцентриситет, наклон) вместе, или по отдельности, - будут испытывать колебания, иногда достаточно большой

амплитуды. Любой из этих сценариев может привести к тому, что объект перейдет на новую орбиту. В этом случае движение будет неустойчивым по Ляпунову.

Как формируется хаотический режим поведения динамической системы? Как правило, хаотическое поведение является следствием взаимодействия резонансов в результате перекрытия соседних резонансных зон. В этом случае формируется зона хаоса, характерная тем, что основные динамические параметры системы, в частности позиционные элементы орбиты, очень быстро изменяют свои значения, причем последующее состояние системы практически не зависит от предыдущего. Хаотическое движение может наблюдаться и при отсутствии резонансов, например, при гравитационных маневрах и сближениях малых тел с большими планетами. В этом случае направление движения тела после маневра или сближения сильно зависит от начальных данных. После двух-трех маневров, тела, стартовавшие практически из одной точки, могут оказаться на существенно различных орбитах. Такое движение можно сравнить с перемещением по крупному городу с большим числом пересадок. Небольшая разница в положении или моменте старта может привести к критически различным финалам. Для анализа скорости разбегания соседних траекторий применяют специальную характеристику, называемую временем Ляпунова. Она определяет промежуток времени, в течение которого расстояние между соседними траекториями увеличивается в  $e$  раз. Наиболее сильно хаотическое поведение проявляется у малых тел Солнечной системы. Именно с них мы и начнем обзор динамической эволюции объектов Солнечной системы.

### **Особенности динамической эволюции малых тел Солнечной системы.**

Обзор динамики малых тел Солнечной системы начнем с астероидов и попытаемся разобраться, как образовались люки Кирквуда и почему они существуют по сей день.

Как уже упоминалось, люки соответствуют резонансным значениям больших полуосей орбит астероидов. Мы рассмотрим три резонанса средних движений между астероидом и Юпитером:  $3/1$  — люк Гестии,  $2/1$  — люк Гекубы и  $3/2$  — группа Гильды. В 1982 г. Ж.Висдом (Калифорнийский технологический институт, США) исследовал движение астероидов, находящихся в резонансе  $3/1$  в рамках ограниченной задачи трех тел Солнце–Юпитер–астероид на интервале времени 20 млн. лет. В отличие от своих предшественников он учел эксцентриситет орбиты Юпитера. Висдом обнаружил несколько астероидов, которые на рассматриваемом интервале скачком увеличивали эксцентриситет своей орбиты от 0 до 0.35. Такого эксцентриситета достаточно, чтобы астероид стал двигаться по орбите, пересекающей орбиту Марса. Эффективное время сближения с Марсом порядка 100–200 млн. лет. После сближения с Марсом астероид уйдет из главного пояса в область планет земной группы. Более поздние исследования показали, что в окрестностях резонанса  $3/1$  эксцентриситет может скачкообразно увеличиваться до 0.9, что должно приводить к сближению астероидов с Землей и Венерой. Эффективное время сближения с этими планетами значительно меньше, чем с Марсом. Таким образом, на космогонически коротком интервале времени почти все астероиды, двигавшиеся вблизи резонанса  $3/1$  с Юпитером, были выброшены в область планет земной группы.

Многочисленные попытки использовать механизм, предложенный Висдомом, для объяснения происхождения люка Гекубы (резонанс  $2/1$ ) не дали желаемого увеличения эксцентриситета до 0.49, когда становятся возможны сближения астероидов с Марсом. В 1994 г. С.Ферраз-Мелло (Университет Сан-Пауло, Бразилия) опубликовал результаты исследования движения астероидов в резонансе  $2/1$  с Юпитером в рамках задачи четырех тел Солнце–Юпитер–Сатурн–астероид. Оказалось, что эволюция эксцентриситета идет очень быстро. За 5 млн. лет он увеличивается от 0.05–0.1 до 0.4–0.5, а за 12 млн. лет — до 0.7–0.9. В последнем случае астероид может сблизиться с Землей.

Если в зоне резонансов 3/1 и 2/1 астероиды практически не наблюдаются, то в резонансе 3/2 обнаружена целая группа из 53 астероидов. Она носит название группы Гильды. Все астероиды этой группы имеют эксцентриситеты, превышающие 0.1, и малые наклоны орбит. В 1993 г. Ф.Франклин, М.Лекар и М.Морисон из Гарвардского астрофизического центра исследовали причины устойчивости движения астероидов в резонансе 3/2 с Юпитером. Они рассмотрели задачу четырех тел Солнце–Юпитер–Сатурн–астероид. Результаты моделирования показали, что время, в течение которого влияние резонансов ведет к распаду группы, превышает возраст Солнечной системы и составляет около 40 млрд. лет. Для астероидов с эксцентриситетами орбит меньшими 0.1 интервал времени, на котором происходит уход из группы, значительно короче и не превышает возраста Солнечной системы. Поэтому сейчас в группе Гильды нет астероидов с эксцентриситетами меньшими 0.1. В случае резонанса 3/2 мы встретились со случаем, когда движение объектов остается устойчивым на очень больших временах, но влияние резонансов в конце концов приведет к хаотизации их движения и последующему распаду группы.

Рассмотренные примеры показывают, что движение объектов по резонансным орбитам в поясе астероидов приводит к выбросу этих объектов в область планет земной группы. Динамическая эволюция астероидов, движущихся среди внутренних планет была рассмотрена в 1994 г. Ш. Фрошле (Обсерватория Лазурный берег, Франция). По результатам численного моделирования были сделаны следующие выводы. Под действием вековых резонансов с планетами земной группы эксцентриситеты орбит астероидов будут значительно увеличиваться. Если в процессе динамической эволюции астероид не столкнется с планетой, то после того, как перигелийное расстояние его орбиты станет меньше радиуса Солнца, он упадет на Солнце. Динамическое время жизни астероида среди планет земной группы очень короткое и для того, чтобы популяция астероидов, сближающихся с внутренними планетами, не исчезла, необходим постоянный приток новых объектов, выбрасываемых из главного пояса за счет резонансных возмущений.

В июне 1997 г. П.Вигерт (Университет Йорка, Канада) сообщил о том, что астероид 3753 Cruithne является компаньоном Земли. Этот объект относится к группе астероидов, сближающихся с Землей. Его движение относительно Земли можно представить в виде подковообразной орбиты, складывающейся из годичных витков спирали, по форме напоминающих фасоль. Путь астероида по подкове занимает 385 лет. Каждые 385 лет астероид сближается с Землей на минимальное расстояние и ее тяготение изменяет большую полуось его орбиты от 0.997 до 1.003 а.е. или обратно. Из-за большого эксцентриситета (0.5) и прецессии орбиты такое движение является неустойчивым. С большой вероятностью астероид 3753 столкнется с Венерой около 8000 г. Это является еще одним подтверждением того, что астероиды, сближающиеся с Землей, имеют короткую шкалу динамической эволюции.

В последнее время проявляется повышенный интерес к динамике астероидов типа троянцев, движущихся в окрестности треугольных точек либрации планет-гигантов. Треугольные точки либрации расположены на орбитах планет по обе стороны от текущего положения планеты и удалены от него на  $60^\circ$ . В задаче трех тел Солнце–планета–астероид движение в окрестности треугольной точки либрации является устойчивым, если масса астероида достаточно мала по сравнению с массой планеты. В действительности же на тела, находящиеся в окрестности треугольных точек либрации планет, действуют возмущения и от других объектов. Как это влияет на устойчивость?

В январе 1997 г. Г.Левисон (Юго-западный исследовательский институт, США), Е.Шумейкер (Ловелловская обсерватория, США) и К.Шумейкер (Северный университет Аризоны, США) опубликовали результаты исследований по динамической эволюции орбит астероидов-троянцев Юпитера. Оказалось, что время устойчивого существования астероидов в окрестности треугольной точки либрации существенно зависит от

собственного эксцентриситета орбиты астероида и амплитуды либрационного движения. Чем меньше собственный эксцентриситет и амплитуда либрации, тем дольше астероид будет находиться в зоне устойчивости. Для 178 известных на момент исследования астероидов-троянец Юпитера граница интервала устойчивого движения находится на уровне 100 млн. — 1 млрд. лет. Было проведено численное моделирование движения 36 астероидов-троянец, находящихся вблизи указанной границы, на интервале 4 млрд. лет. В итоге 21 астероид с временем устойчивой эволюции менее 1 млрд. лет покинул группу астероидов-троянец. Ушедшие астероиды перешли на орбиты, подобные орбитам комет семейства Юпитера. Дополнительное статистическое исследование показало, что среди наблюдаемых 150 комет семейства Юпитера, только одна могла быть ранее астероидом-троянцем. По результатам сравнения орбиты кометы Шумейкеров–Леви 9 с элементами орбит выброшенных троянцев сделан вывод, что эта комета не могла быть ранее астероидом-троянцем.

С.Миккола (Университет Турку, Финляндия) и К.Иннанен (Университет Йорка, Канада) в 1992 г., а М.Холман и Ж.Висдом (Массачусетский технологический институт, США) в 1993 г. исследовали движение астероидов типа троянцев в окрестностях треугольных точек либрации Сатурна, Урана и Нептуна. Троянцы Сатурна ушли из окрестностей точек либрации за время около 10 млн. лет. Это следствие сильных возмущений со стороны Юпитера. Орбиты троянцев Урана и Нептуна эволюционируют более медленно. Можно выделить области устойчивого движения (на рассмотренном интервале 20 млн. лет), в которых можно ожидать обнаружение новых объектов.

Таким образом, движение большинства астероидов-троянец планет-гигантов можно считать устойчивым только на ограниченном интервале времени. Этот интервал изменяется от нескольких миллионов лет для троянцев Сатурна до нескольких миллиардов лет для троянцев Юпитера.

Для тел, движущихся за внешней границей пояса астероидов, разделение на кометы и астероиды достаточно условно. Один и тот же объект в афелии может наблюдаться как астероид, а в перигелии — как комета. Малые тела, движущиеся во внешней области Солнечной системы, вне зависимости от их наблюдательного статуса, связаны общей динамической эволюцией, в процессе которой возможен переход между различными группами объектов.

Большинство известных короткопериодических комет принадлежат семейству Юпитера. Их периоды не превышают 20 лет, а перигелии орбит лежат внутри орбиты Юпитера. Поэтому динамическая эволюция этих комет определяется их взаимодействием с Юпитером. В 1995 г. Танкреди (Уругвай) исследовал динамику комет семейства Юпитера. Было проведено численное интегрирование уравнений движения 145 комет этого семейства (всех известных на момент исследования) на интервале 200 тыс. лет. В итоге 5 комет были выброшены на гиперболические орбиты. Из оставшихся 140 комет для 137 время Ляпунова концентрировалось между 50 и 150 годами при среднем значении 60 лет. Короткие времена Ляпунова свидетельствуют, что движение комет происходит в зоне сильного хаоса, которая является следствием частых сближений комет с Юпитером. Результаты моделирования показывают, что после двух тесных сближений с Юпитером комета “забывает” свою прошлую траекторию.

Результаты, полученные М.Холманом и Ж.Висдомом в 1993 г. позволяют объяснить малое число наблюдаемых объектов группы Кентавра. Исследование эволюции орбит 3000 пробных частиц на первоначально круговых орбитах в области движения планет-гигантов показало, что большинство частиц покинуло область между орбитами Юпитера и Сатурна на интервале 10–100 тыс. лет, через 1 млн. лет все частицы покинули эту область. Причина такого поведения в частых сближениях частиц с Юпитером и Сатурном. Уход частиц и областей между орбитами Сатурна и Урана и орбитами Урана и Нептуна происходит значительно медленнее. Большинство частиц покинули эти области через 10 млн. лет. После 800 млн. лет все частицы между орбитами Сатурна и Урана были

выброшены. Между орбитами Урана и Нептуна осталось всего 6 частиц в области треугольных точек либрации Нептуна. Итак, динамическое время жизни малых тел в области планет-гигантов намного меньше возраста Солнечной системы. Это объясняет почему группа Кентавра столь малочисленна.

М.Холман и Ж.Висдом рассмотрели также вопрос о происхождении короткопериодических комет и динамике объектов пояса Койпера. Было показано, что объекты с малыми наклонами и эксцентриситетами, имеющие большие полуоси меньше 42 а.е., могут существенно увеличить эксцентриситет своей орбиты в результате сближений с Нептуном на интервале 10–100 млн. лет. После чего эти объекты могут вести себя либо как короткопериодические кометы, либо как астероиды группы Кентавра. Если начальные значения наклона и эксцентриситета орбиты объекта в поясе Койпера не являются малыми, то распределение областей устойчивого и неустойчивого движения становится весьма сложным. Но можно сделать вывод, что источниками короткопериодических комет являются тела, имеющие большие полуоси от 35 до 45 а.е.

В целом происхождение и динамическую эволюцию короткопериодических комет можно представить следующим образом. Объекты из внутренней области пояса Койпера под действием резонансных возмущений от Нептуна увеличивают эксцентриситеты своих орбит. Когда перицентры орбит попадают в область движения планет-гигантов, происходит сближение с одной из планет и объект переходит на орбиту, целиком лежащую в этой области, то есть становится Кентавром. Но подобные орбиты неустойчивы и объект за сравнительно короткое время покидает эту область. Может оказаться, что в процессе эволюции объект подойдет слишком близко к Солнцу и будет наблюдаться как короткопериодическая комета. Однако, как мы видели на примере комет семейства Юпитера, движение объекта из-за частых сближений с планетами-гигантами будет хаотическим. То, что такие сближения происходят достаточно часто, подтверждается наблюдениями. Наиболее эффектное событие такого рода произошло в июле 1992 г., когда после сближения с Юпитером комета Шумейкеров–Леви 9 стала его спутником и через два года в июле 1994 г. вошла в атмосферу Юпитера. Менее зрелищные, но не менее важные для небесной механики, события происходили с кометами Вольфа, Отерма 3 и многими другими.

### ***Роль Луны.***

Численное моделирование поведения системы Земля–Луна на интервале 20 млн. лет в прошлое, и 10 млн. лет в будущее, - показало, что наклон оси вращения Земли колеблется около среднего значения  $23.3^\circ$  с амплитудой  $\approx 1.3^\circ$ . Считается, что это вызывает колебания инсоляции на 20% на широте  $65^\circ$ . Такие изменения потока солнечного тепла могут вызывать существенные климатические изменения, например, оледенения. Перераспределение воздушных и водных масс, рост или уменьшение ледникового покрова в высоких широтах ведут к изменению динамического сжатия Земли. А это ведет к изменению скорости прецессии оси вращения Земли. Прецессия вызывается притяжением экваториального избытка массы Земли Луной и Солнцем и возмущениями гелиоцентрического движения Земли со стороны планет. В современную эпоху скорость прецессии составляет  $50.4712''$  в год. Частота возмущающей силы, вызываемой движением перицентров Юпитера и Сатурна и долготы восходящего узла Юпитера равна  $50.3021''$  в год. Томсон в 1990 г. оценил изменение скорости прецессии за счет изменения динамического сжатия Земли при переходе от межледниковья к ледниковому периоду. Скорость прецессии уменьшается на  $0.35''$  в год. Это значительно больше разности между скоростью прецессии и возмущающей частотой. Следовательно, при смене климатических ситуаций Земля должна проходить через резонанс, вызываемый возмущениями от Юпитера и Сатурна. Для того чтобы наблюдались неоднократные переходы между оледенениями и межледниковьями, необходимо иметь устойчивые состояния, соответствующие этим климатическим ситуациям.



Ж.Ласкар и др. (Laskar et al., 1993) исследовали поведение частоты прецессии и наклона оси вращения Земли на интервале 18 млн. лет при значениях динамического сжатия Земли от 0.9940 до 1.0015 (современное значение принято за единицу). Результаты расчетов представлены на рисунках. Для наклона оси вращения Земли определялись среднее, минимальное и максимальное значения на рассматриваемом интервале. Точный резонанс достигается при динамическом сжатии 0.9977 от современного значения. Переход через резонанс в сторону уменьшения динамического сжатия приводит к уменьшению частоты прецессии с 50.5" до 50.15" в год. Максимальный наклон оси вращения увеличивается на 0.5° и достигает 25°.

На основании результатов моделирования можно предложить следующий сценарий наступления ледниковых периодов. В межледниковую эпоху за счет уменьшения ледяного покрова в высоких широтах уменьшается динамическое сжатие Земли. После прохождения через резонанс, резко увеличивается наклон эклиптики к экватору. Это ведет к уменьшению инсоляции в высоких широтах. Начинается оледенение. Рост ледяного покрова в высоких широтах ведет к увеличению динамического сжатия Земли. После прохождения через резонанс наклон эклиптики к экватору резко уменьшается. Увеличивается инсоляция в высоких широтах. Наступает межледниковая эпоха. После чего цикл повторяется снова. Таким образом, повторяемости ледниковых эпох на Земле мы обязаны совместному влиянию Луны, Солнца, Юпитера и Сатурна. Как сильно влияет Луна на устойчивость оси вращения Земли? Оказывается, Луна - мощный стабилизатор скорости прецессии и угла наклона оси вращения Земли. Ж.Ласкар, Ф.Жутел и Ф.Будин рассмотрели эволюцию оси вращения Земли в отсутствие Луны. Частота прецессии уменьшилась до 15.6" в год, а амплитуда изменения наклона оси вращения увеличилась: переход от 15° до 30° совершается менее, чем за 200 тыс. лет. Это должно вести к существенным изменениям инсоляции Земли и, как следствие, к резким колебаниям климата.

Первоначальный период вращения Земли составлял около 15 часов. В современную эпоху за счет приливного трения со стороны Луны и Солнца скорость вращения замедлилась и период вращения достиг 24 часов. В отсутствие Луны скорость осевого вращения Земли изменялась бы значительно медленнее, поскольку приливное трение от Солнца в два раза меньше, чем от Луны. Ж.Ласкар показал, что при малых значениях скорости прецессии (порядка 15" в год) для всех периодов вращения Земли от 12 до 48 часов будут характерны быстрые хаотические изменения наклона оси вращения от 0° до 85° при типичных переходах от 0° до 60° на интервале менее 2 млн. лет, что приведет к катастрофическим изменениям климата.

Система Земля–Луна эволюционирует. За счет приливной диссипации энергии Луна медленно удаляется от Земли, а Земля замедляет свое вращение вокруг оси. Как долго будет сохраняться устойчивое вращение Земли вокруг оси? Что ждет систему Земля–Луна в будущем? Этим вопросам было посвящено исследование Нерона де Суржи и Ж.Ласкара (Neron de Surgy, Laskar, 1997). Рассматривалось поведение системы Земля–Луна на интервале 5 млрд. лет в будущее. Было показано, что через 1.5 млрд. лет наклон оси вращения Земли попадет в зону хаоса. Чтобы исследовать его хаотическое поведение, было проведено 500 численных экспериментов. Начальные данные для каждого варианта отличались от соседнего на  $10^{-9}$  радиан по начальной фазе прецессии и на  $10^{-8}$  градуса по начальному наклону оси вращения. Даже столь малые отличия начальных данных, в силу хаотического поведения системы, давали существенно различные варианты эволюции. На первых 1.5 млрд. лет решения хорошо согласуются. При достижении наклона 60° ось вращения Земли попадает в зону хаоса, для которой характерны быстрые блуждания траектории, ведущие к резким изменениям наклона.

В зоне хаоса соседние траектории “забывают” о своем родстве и эволюционируют независимо. Поскольку наблюдения позволяют получать значения параметров лишь с ограниченной точностью, то сейчас мы не можем сказать, по какой траектории пойдет

развитие системы после 1.5 млрд. лет. Но мы можем исследовать поведение пучка траекторий с начальными данными, лежащими в малой окрестности относительно наблюдаемых параметров, и выяснить, какие сценарии эволюции возможны.

### **Хаос в наклонах осей вращения планет.**

Большие планеты имеют весьма разнообразные периоды вращения и наклоны осей. Являются ли эти периоды и наклоны начальными или они были приобретены в процессе динамической эволюции?

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Период вращения	58.8 <sup>d</sup>	243 <sup>d</sup>	23 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup>	24 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup>	9 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup>	10 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup>	17 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup>	16 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup>
Наклон оси вращения	7°	177°22'	23° 26'	25°12'	3° 07'	25° 33'	97° 52'	28° 19'

Меркурий и Венера испытывают сильные приливы со стороны Солнца на протяжении всего времени своего существования, поэтому сейчас скорость их осевого вращения значительно ниже начальной. Венера обладает чертой, которая на протяжении долгого времени интригует астрономов: она вращается в обратном направлении по отношению к своему орбитальному движению. Обычно предполагают, что Венера сформировалась с обратным движением или, по крайней мере, с осью вращения, лежащей в плоскости ее орбиты, так что последующее действие диссипативных сил, происходящих от солнечных приливов, взаимодействия кора–мантия и т.п., могли привести к обратному вращению. Такие предположения накладывают ограничения на модели формирования Солнечной системы. Они требуют присутствия короткой стохастической фазы в конце процесса формирования с умеренным числом мощных соударений массивных объектов для того, чтобы получить желаемую ориентацию планеты.

Вместо этого Ж.Ласкар и П.Робутел показали, что даже, если Венера начала эволюцию со скоростью вращения, подобной земной, в направлении орбитального движения, то наличие большой зоны хаоса могло воздействовать на наклон оси вращения так, чтобы увеличить его и привести ось вращения очень близко к плоскости орбиты. Диссипативные эффекты, описанные выше, могли затем привести ось вращения в ее современное положение, где она и стабилизировалась, так как осевое вращение Венеры продолжало замедляться.

Ситуация с Меркурием отличается незначительно. Также как и в случае Венеры мы не знаем начальный период вращения Меркурия, но достаточно принять его короче 300 часов, чтобы гарантировать сильные хаотические изменения наклона оси вращения в диапазоне от 0° до 90° на интервале в несколько миллионов лет. А далее, как показал в середине 1970-х гг. С.Пил, продолжительное влияние солнечных приливов замедлило его вращение и привело ось вращения в современное положение.

Марс далеко от Солнца, его спутники Фобос и Деймос имеют слишком малые массы, чтобы замедлить его осевое вращение, поэтому можно считать, что его нынешний период вращения близок к начальному. С другой стороны, Ж. Ласкар и П. Робутел и независимо от них Дж.Тома (Университет Торонто, Канада) и Ж. Висдом в 1993 г. показали, что движение оси вращения Марса хаотично, то есть невозможно предсказать ориентацию оси вращения на интервале большем, чем несколько миллионов лет. Наклон оси вращения Марса изменяется от 0° до 60° менее, чем за 50 млн. лет. Б. Джакоски с коллегами пришли к выводу, что при максимально возможном наклоне оси вращения Марса температура на его поверхности повысится настолько, что станет возможным существование воды в жидкой фазе. Сухие русла рек, обнаруженные на Марсе, могут служить хорошим подтверждением хаотического движения его оси вращения.

Интересна структура зоны хаоса. Она лежит в пределах от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  и делится на две области: одна связана с вековым резонансом за счет вращения орбиты Венеры, а другая — с вековым резонансом от орбиты Меркурия. Дрейф в каждой из областей быстрый, а переход из одной области в другую затруднен. Существование этой большой зоны хаоса также снимает ряд ограничений с моделей формирования Солнечной системы, поскольку наклон оси вращения Марса не может считаться начальным и его нынешнее значение, весьма близкое к земному - чистая случайность. С другой стороны, исследования Ж.Ласкара и П.Робутела показали, что наклоны осей вращения планет-гигантов существенно стабильнее и пока невозможно объяснить очень большой наклон оси вращения Урана ( $98^\circ$ ) ее эволюцией после формирования Урана как планеты. Эволюция орбит планет на очень больших интервалах времени

Если проинтегрировать уравнения движения больших планет на интервале времени 5 млрд. лет (что превышает возраст Солнечной системы), то можно ли рассматривать полученное решение как описание эволюции Солнечной системы на этом интервале времени? Нет! Действительно, вследствие экспоненциальной расходимости траекторий со временем Ляпунова 5 млн. лет, после примерно 100 млн. лет вычисленное решение будет очень сильно отличаться от реального, соответствующего действительной Солнечной системе. Однако такое решение представляет определенный интерес, так как оно дает один из возможных вариантов эволюции Солнечной системы. Это — разведчик зоны хаоса, в которой эволюционирует Солнечная система.

Чтобы изучить зону хаоса, одного такого интегрирования на интервале 5 млрд. лет недостаточно. Может показаться странным, но для исследования зоны хаоса можно использовать интегрирование, охватывающее значительно большие интервалы времени. Можно рассматривать решения с очень близкими начальными условиями для того, чтобы достигнуть большей части зоны хаоса, которую может занимать Солнечная система за 5 млрд. лет. Насколько оправдано отслеживание орбит планет Солнечной системы на интервале времени, превышающем возраст Солнечной системы? В зоне хаоса, где эволюционирует Солнечная система, после 100 млн. лет можно дать лишь указание на то, что может произойти. Определить же, когда это произойдет, не представляется возможным. Например, если имеется внезапное увеличение эксцентриситета орбиты планеты после 10 млрд. лет, то это говорит о том, что такое событие может, вероятно, иметь место и на более коротком интервале времени. Аналогично, что было обнаружено при интегрировании назад по времени, можно ожидать также и в будущем и наоборот.

Ж.. Ласкар (Laskar, 1994) представил результаты численного интегрирования осредненных уравнений движения больших планет Солнечной системы на суммарном интервале времени свыше 200 млрд. лет. Рассмотрим результаты, полученные на интервале 25 млрд. лет (от  $-10$  млрд. до  $+15$  млрд. лет). Для исследования дрейфа орбит в зоне хаоса использовались максимумы эксцентриситета и наклона, полученные для каждой планеты на интервале 10 млн. лет. Поведение планет-гигантов настолько регулярно, что максимумы эксцентриситетов и наклонов их орбит практически не меняют своих значений. В противоположность, максимумы эксцентриситетов и наклонов орбит внутренних планет показывают очень большие нерегулярные изменения, которые соответствуют дрейфу в зоне хаоса. Дрейф эксцентриситетов орбит Земли и Венеры умеренный, но достигает 0.02 для обеих планет. Дрейф эксцентриситета орбиты Марса больше и достигает более, чем 0.12, приводя к значению эксцентриситета, превышающему 0.2. Для Меркурия зона хаоса еще больше и достигает 0.4, что приводит к наибольшему значению эксцентриситета 0.5 на рассматриваемом интервале времени. Поведение максимальных наклонов похожее. Для планет-гигантов дрейф практически отсутствует. Для Земли и Венеры — слабый (до  $1^\circ$ ). Для Марса — умеренный (до  $6^\circ$ ). Для Меркурия дрейф достигает  $14^\circ$ , а максимальное значение —  $21^\circ$ . Хотя эксцентриситет Меркурия допускает увеличение до 0.5, этого недостаточно, чтобы его орбита пересекла орбиту Венеры. Может ли Меркурий покинуть Солнечную систему? Для ответа на этот

вопрос Ж.Ласкар провел специальное исследование. Путем выбора вариантов, ведущих к росту эксцентриситета, удалось получить два сценария эволюции орбиты Меркурия, которые приводят к значениям эксцентриситета, близким к единице. В первом случае на отметке –6 млрд. лет, во втором — +3.5 млрд. лет. С ростом эксцентриситета орбиты Меркурия увеличивается и ее наклон. Вычисление относительных положений точек пересечения орбит Меркурия и Венеры с их линией узлов, показало, что орбиты действительно пересекутся около 3.5 млрд. лет. В это время планеты могут испытать близкое прохождение, которое может привести к уходу Меркурия или столкновению.

Подобные вычисления выполнялись также для Марса и Земли, но пока не привели к решению с уходом из Солнечной системы. Для Земли на интервале 5 млрд. лет максимальный эксцентриситет достиг 0.1, для Марса на том же интервале - 0.25. При таком значении эксцентриситета Марс очень близко подходит к Земле и может быть существует решение, приводящее к уходу Марса, но пока оно не обнаружено.

Существование орбиты ухода для Меркурия не означает, что этот уход обязательно будет иметь место. Фактически, решения, ведущие к уходу, были скупуплезно сшиты. На каждом шаге делался выбор из 4 или 5 эквивалентных решений. На интервале 6 млрд. лет сшивалось 18 решений, на интервале 3.5 млрд. лет - 13. Полученные результаты указывают на существование орбиты ухода, но ничего не говорят о вероятности этого события. Пока можно лишь сказать, что вероятность ухода Меркурия из Солнечной системы малая, но отличная от нуля.

За исключением малого пространства между областями, посещаемыми Венерой, Землей и Марсом, вся внутренняя часть Солнечной системы заполнена. Дополнительная планета, даже небольшая, вроде Меркурия, добавленная в эту внутреннюю область, существенно увеличит вероятность столкновения с существующими планетами. И если раньше в этой области существовали подобные дополнительные планеты, то они выбрасывались из этой области до тех пор, пока в ней не сформировалась современная динамическая картина.

Какой же вывод можно сделать об устойчивости Солнечной системы? Движение планет Солнечной системы нерегулярно и не может приближаться почти периодической траекторией на интервале более чем 10 или 20 млн. лет. Экспоненциальная расходимость траекторий делает практически невозможным предсказание эволюции Солнечной системы за пределом в 100 млн. лет.

Однако этот результат в основном относится к внутренним планетам: Меркурию, Венере, Земле и Марсу. Хотя внешние планеты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) испытывают возмущения от внутренних планет, но эти возмущения малы и их хаотическое влияние будет приводить лишь к небольшому дрейфу орбит планет-гигантов. Планетную систему, ограниченную планетами-гигантами, а тем более парой Юпитер–Сатурн, можно считать устойчивой в смысле теории Колмогорова–Арнольда–Мозера.

Солнечная система может рассматриваться, как предельно устойчивая система, в которой сильные неустойчивости (соударения или уход) могут иметь место только на временной шкале, сравнимой с ее возрастом: около 5 млрд. лет. Очевидно, что устойчивость системы может обеспечить только гравитационное взаимодействие между звездой и всеми планетами и спутниками системы, однако современные представления о природе гравитации не находят простого и прозрачного физического механизма, обеспечивающего подобную устойчивость системы.

Принципиальный момент во всех проблемах Солнечной системы, несомненно, заключается в правдоподобности механизма её образования. В качестве иллюстрации «успехов» в этом направлении сошлемся на краткий обзор новых результатов по образованию Солнечной системы и составляющих ее тел (например, системы Земля–Луна). Относительно детально обсуждаются три темы, связанные с малыми телами,

планетами земного типа и планетами-гигантами. Обзор Crida A. «Образование Солнечной системы» - опубликован 17 марта 2009 в arXiv:0903.3008.

Дается краткий обзор новых результатов по образованию Солнечной системы и составляющих ее тел (например, системы Земля-Луна). Относительно детально обсуждаются три темы, связанные с малыми телами, планетами земного типа и планетами-гигантами.

Первая связана с новыми результатами, говорящими о том, что железные метеориты могли образовываться раньше хондр. Это противоречит стандартному сценарию, т.к. для формирования железных метеоритов нужна дифференциация элементов в массивных телах, а хондры считались самыми первыми из образовавшихся структурных элементов. Похоже, что в начале формировались планетезимали (в области, где потом появятся планеты типа Земли, там динамическое время мало), а потом, в результате разрушения планетезималей, образуются хондры. Тогда же из тех же планетезималей могли сформироваться железные метеориты.

Второй сюжет связан с формированием системы Земля-Луна. Приводятся аргументы в пользу того, что столкновение произошло в самом конце фазы гигантских столкновений. Это было спустя примерно 60-100 мил. лет после формирования Солнечной системы.

Третий отрывок посвящен миграции планет-гигантов. В новой модели конфигурация планет-гигантов в начале была более компактной, но потом Юпитер сдвинулся внутрь системы, а три остальных гиганта - наружу. Это позволяет объяснить некоторые особенности в распределении малых тел. Подвижки связаны с рассеянием планетезималей. Конечно, новая модель не отменяет ранней миграции внутрь протопланетного диска.